الفصل العاشر

الأخطار الإشعاعية الخارجية

External radiation hazards

- الإشعاعات الطبيعية في البيئة ومصادرها – جرعات المصادر الصناعية – حساب معدل الجرعة لمصادر جسيمات بيتا – حساب معدل الجرعة لإشعاعات جاما – دروع الجسيمات والإشعاعات وحساباتها– مصادر الأخطار الخارجية والوقاية منها – أسئلة ومسائل مراجعة.

10-1 مصادر الإشعاعات الطبيعية في البيئة

The natural sources of radiation and their sources

يتعرض الإنسان، منذ نشأته، إلى جرعة إشعاعية معينة صادرة من البيئة التي يعيش فيها ومن الغذاء الذي يتناوله، والهواء الذي يتنفسه. وتعرف هذه الجرعات بالجرعات الإشعاعية البيئية الطبيعية. ولا تشكل هذه الجرعات الطبيعية خطورة ملحوظة حيث أن كمياتها تكون عادة ضمن حدود غير عالية، ويعيش الإنسان فيها منذ بدء الخليقة. وتعتبر كل من الأشعة الكونية والإشعاعات المحلية الصادرة عن التربة، وكذلك المواد المشعة الموجودة ضمن تكوين أجسام الكائنات الحية من أهم مصادر الجرعات الإشعاعية الطبيعية.

10-1-1 الأشعة الكونية (The cosmic rays)

تصل كميات كبيرة من الأشعة الكونية المؤينة إلى الغلاف الجوي المحيط بالأرض قادمة من الفضاء الخارجي ومن الشمس. وتحتوي هذه الأشعة على أنواع مختلفة من الجسيمات النووية بطاقات عالية كالبروتونات والنيوترونات وغيرها، وتعرف باسم الأشعة الكونية الأولية (The primary cosmic rays). وعند دخول هذه الجسيمات إلى الغلاف الجوي للأرض فإنها تتفاعل مع المواد التي يتكون منها هذا

الغلاف، فتتغير بذلك مكوناتها وتضعف كمياتها التي تصل إلى سطح الأرض. وتعتمد الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان من الأشعة الكونية على عدة عوامل هي خط العرض بالنسبة للكرة الأرضية، والارتفاع عن سطح البحر، فضلا عن النشاط الشمسي والضغط الجوي.

فالمركبة المشحونة من الأشعة الكونية (كالبروتونات) تتأثر عند اقترابها من سطح الأرض بالمجال المغناطيسي للأرض الذي يحرفها بعيدا عن خط الاستواء في اتجاه القطبين، مما يؤدي إلى زيادة كثافتها كلما اقتربنا من القطبين بالمقارنة بخط الاستواء عند نفس الارتفاع عن سطح البحر. أما النيوترونات فإنها لا تتأثر بالمجال المغناطيسي، ولذلك تتساوى الجرعات الناتجة عن النيوترونات عند خطوط العرض المختلفة.

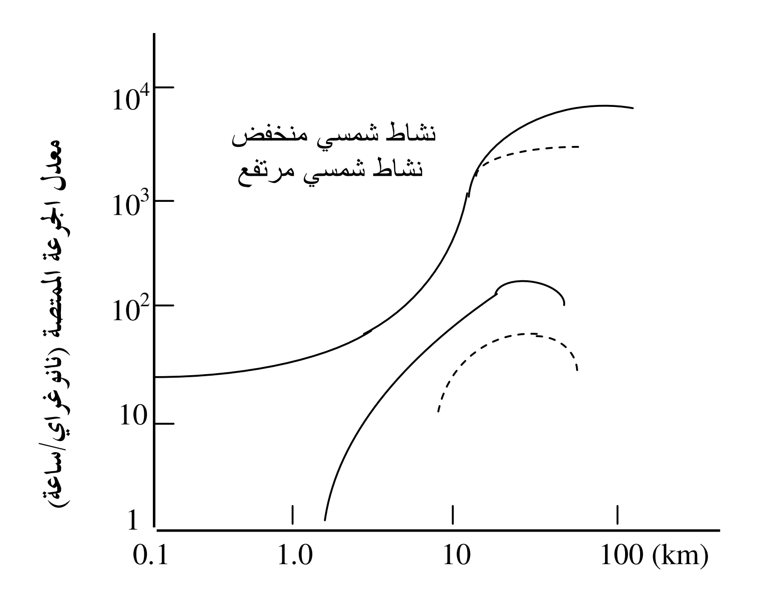
ويلعب الارتفاع عن سطح البحر دورا هائلا في تغيير مقدار الجرعة الناتجة عن الأشعة الكونية. ويختلف الدور باختلاف نوع هذه الأشعة.

فبالنسبة للنيوترونات تكون الجرعة الناتجة عنها عند سطح البحر في حدود 30 ميكروسيفرت في السنة، وهي جرعة محدودة. إلا أن دور النيوترونات يتنامى بشكل سريع بدءا من ارتفاع يبلغ 1 كم فوق سطح البحر. أما بالنسبة للمركبة المؤينة تأيينا مباشرا كالبروتونات فإنها تلعب دورا ملحوظا بدءا من مستوى سطح البحر، حيث تبلغ الجرعة الفعالة الناتجة عنها، عند سطح البحر وعند خط الاستواء، حوالي 240 ميكروسيفرت في السنة. وتزداد هذه الجرعة زيادة بطيئة بزيادة الارتفاع، ثم تتزايد بسرعة كبيرة مع الارتفاع بدءا من 1 كم. ويبين شكل (10–1) كيفية تغير كل من هاتين المركبتين كدالة من الارتفاع عن سطح البحر عند خط عرض 50 درجة شمالا أو جنوبا.

كذلك، يبين جدول (10–1) قيم الجرعات الفعالة السنوية الناتجة عن مركبتي الأشعة الكونية في بعض المدن في العالم مع بيان المتوسط

العالمي للجرعة السنوية الفردية من الأشعة الكونية، وفقا لبيانات اللجنة العلمية للأمم المتحدة في تقاريرها لعامي 1988م، 1993 م.

وتجدر الإشارة إلى أن المتوسط العالمي للجرعة الفعالة السنوية الناتجة عن الأشعة الكونية قد تم تقديره على أساس الأعداد السكانية عند الارتفاعات وخطوط العرض المختلفة. بمعنى آخر، فإن القيم الواردة في الجدول للمتوسط العالمي تعتبر قيما موزونة بالنسبة لأعداد السكان عند الارتفاعات وخطوط العرض المختلفة. كذلك، أخذ دور تأثير المساكن على قيمة الجرعة الفردية من الأشعة حيث يعتبر أن الإنسان يقضي في المتوسط 80 % من الوقت داخل مساكن تحقق بعض الوقاية من تأثير الأشعة الكونية.



شكل(10−1)
كيفية تغير مركبات الأشعة الكونية كدالة من الارتفاع
عند خط عرض 50 درجة

جدول (10-1)
الجرعات الناتجة عن الأشعة الكونية في بعض مدن العالم
والمتوسط العالمي للجرعة السنوية الفردية

المكان	الارتفاع (بالمتر)	الجرعة الفعالة السنوية(ميكروسيفرت)		
		مركبة مؤينة	نيترونات	المجموع
مستوى سطح البحر	صفر	240	30	270
طهران	1180	330	110	440
دنفر(الولايات المتحدة)	1610	400	170	570
مدينة المكسيك	2240	530	290	820
كويتو(اكوادور)	2840	690	440	1130
لاسا(الصين	3600	970	740	1710
لاباز(بوليفيا)	2900	1120	900	2020
المتوسط العالمي		300	80	380

ويتضح من هذا الجدول ومن الشكل(10-1) أن الجرعة الإشعاعية الناتجة عن الأشعة الكونية تكاد تتضاعف عند ارتفاع يبلغ حوالي 1.5كم من سطح البحر. كما يتضح دور الغلاف الجوي المحيط بالأرض كحاجز واق من الأشعة الكونية. وعند حساب الخصائص الوقائية للغلاف الجوي يتضح أنه يكافئ حاجزا مائيا سمكه حوالي 10.3 أمتار.

وبالإضافة إلى التأثير المباشر للأشعة الكونية على الكائنات الحية فإنها تؤدي إلى إنتاج بعض المواد المشعة في الغلاف الجوي نتيجة تفاعلها مع مكونات هذا الغلاف. فمثلا يتكون الكربون 14 المشع في الجو نتيجة تفاعل نيوترونات الأشعة الكونية مع النيتروجين 14، الذي يمثل المكون الرئيس للغلاف الجوي، وذلك طبقا للتفاعل التالي:

$$^{14}N + n \longrightarrow {}^{14}C + p$$

وينتشر الكربون 14 في الغلاف الجوي حتى يصل إلى سطح الأرض فيدخل في تركيب جميع الكائنات الحية الموجودة على الأرض بنسبة ثابتة. كذلك، تتكون بعض النظائر الأخرى كالكالسيوم41 (عمره النصفي 1.1×10^{5} سنة) والكلور 36 (عمره النصفي 3.08×10^{5} سنة) وغيرها.

10-1-2 الإشعاعات الصادرة من التربة

The terrestrial radiation

تحتوي القشرة الأرضية على كميات ضئيلة من النويدات المشعة طويلة العمر مثل اليورانيوم 338 ، واليورانيوم235، والثوريوم 232 ، ونويداتهم الوليدة (راجع الباب الثاني). كما تحتوي هذه القشرة على كميات قليلة من نظير البوتاسيوم 40 المشع الذي يبلغ عمره النصفي 1.28×10^{9} سنة، والروبيديوم 87 ، الذي يبلغ عمره النصفي حوالي 4.7×10^{5} سنة. وتتفكك هذه النويدات مصدرة جسيمات ألفا أو بيتا، وقد يتبع ذلك إصدار إشعاعات جاما. ولا تمثل جسيمات ألفا أية مخاطر إشعاعية على البشر الذين يعيشون فوق الأرض نظرا لقصر مداها. كذلك، لا تمثل جسيمات بيتا مخاطر ملموسة. أما بالنسبة لإشعاعات جاما ذات القدرة الاختراقية العالية فإنها تمثل الإسهام الرئيس في الجرعة الإشعاعية الصادرة عن التربة.

ويعتمد مقدار الجرعة السنوية الناتجة عن إشعاعات جاما على نوع التربة وعلى نسبة تركيز النويدات المشعة فيها. وتتفاوت تراكيز النويدات المشعة تفاوتا كبيرا تبعا لنوع التربة حيث يزداد تركيز اليورانيوم، على سبيل المثال، في الصخور الجرانيتية أو التربة الطفلية. ويبين جدول (10-2) قيم معدلات الجرعة الفعالة السنوية التي يتعرض لها البشر في بعض الأماكن من إشعاعات جاما الصادرة عن التربة، وكذلك قيمة المتوسط الموزون عالميا لهذا المعدل، وفقا لبيانات اللجنة العلمية للأمم المتحدة.

كذلك، اتضح من جميع القياسات التي تمت داخل المساكن وخارجها أن معدلات الجرعة الفعالة داخل المساكن تبدو، عموما، أعلى منها خارجها بحوالي 40 – 45 % في المتوسط. ويعود السبب في ذلك إلى مواد البناء المستخدمة في بنـــاء المساكن التي تحتوي على تراكـــيز

جدول (10–2)
قيم معدلات الجرعة الفعالة السنوية من إشعاعات جاما الأرضية في بعض الأماكن والمتوسط العالمي للمعدل

المكان	معدل الجرعة السنوية بالميللي سيفرت
كندا	0.23
الصين	0.55
الدنمارك	0.36
هونج كونج	1.32
اليابان	0.32
السويد	0.65
المملكة المتحدة	0.35
الولايات المتحدة الأمريكية	0.28
المتوسط العالمي	0.46

متفاوتة من المواد المشعة الطبيعية مثل نويدات سلاسل اليورانيوم238 والأكتينيوم، والثوريوم 232، وكذلك نويدات البوتاسيوم 40.

10–1–3 المواد المشعة الموجودة داخل جسم الكائن الحي

يحتوي جسم الكائن الحي على كميات ضئيلة من النظائر المشعة كالكربون 14 والبوتاسيوم 40 (عمره النصفي 1.28×10^{9} سنة). فالبوتاسيوم 40 موجود في الطبيعة مع البوتاسيوم 39 المستقر بنسبة 11.7 : 100000. وحيث إن كتلة جسم الإنسان المعياري البالغ تبلغ 70 كغم تحتوي على حوالي 140 غراما من البوتاسيوم 39 فإن هذه الكتلة الأخيرة تحتوي على 0.16 جرام من البوتاسيوم 40 المشع. وتصدر هذه الكمية من البوتاسيوم المشع حوالي 4200 تفككا في الثانية

الواحدة. منها 89 % في شكل جسيمات بيتا بطاقة قصوى مقدارها 1.461 م.إ.ف. وتمتص طاقة جسيمات بيتا بالكامل داخل الجسم البشري كما تمتص 50 % من طاقة إشعاعات جاما داخله. وتؤدي هذه الإشعاعات إلى جرعة مكافئة سنوية مقدارها 0.2 ميللي سيفرت . ويبين جدول (10-3) أهم المواد المشعة الموجودة داخل جسم الإنسان ومقدار الجرعة المكافئة السنوية الناتجة عن كل منها.

جدول (10-3)
المواد المشعة الموجودة طبيعيا داخل
الجسم البشري والجرعات الناتجة عنها

اسم النظير	عدد التفككات في الجسم البالغ (في الثانية)	الجرعة المكافئة السنوية بالميللي رم
بوتاسيوم 40	4200	20
كربون14	3210	1
راديوم 226	5-4	5-0.5
بولونيوم 210	8	1.4-0.1 في العظام
سترونشيوم 90	300-25	0.4 - 17 في العظام 4.5-0.4 في النخاع
المجموع		49-23.5

10-1-4 غاز الرادون The radon

يعتبر غاز الرادون هو المساهم الأكبر في تعرض الإنسان لمصادر الإشعاع الطبيعية. ويوجد في الطبيعة للرادون ثلاثة نظائر مشعة هي الرادون 222 وينتج عن سلسلة اليورانيوم 238 بعد تفكك الراديوم 226، والرادون 220 الذي ينتج عن تفكك سلسلة الثوريوم بعد تفكك الراديوم 224، ثم الرادون 219 الذي ينتج عن تفكك سلسلة اليورانيوم 235 بعد تفكك الراديوم 223 .

ولا يمثل الرادون 219 مخاطر بشرية محسوسة نظرا لقلة نسبة اليورانيوم 235 في الطبيعة، وانخفاض العمر النصفي للرادون 219.

ويمثل الرادون 220 مخاطر محدودة تزيد في المناطق الغنية بالثوريوم 232. أما نظير الرادون 222 فيمثل أكبر المخاطر على الإطلاق نظرا لأنه يتميز بعمر نصفي طويل نسبيا (3.82 يوم).

ويزيد تركيز غاز الرادون داخل المباني بالمقارنة بتركيزه في الهواء الطلق. ويعتمد تركيز الرادون داخل المباني على نوع التربة ونوع الجدران وأسلوب التهوية. ففي المباني المفتوحة ذات التهوية المستمرة يكون تركيز الرادون داخل المبنى مقاربا لتركيزه في الهواء الطلق. أما في الأماكن المغلقة التي لا يتجدد هواؤها باستمرار بغية ترشيد استهلاك الطاقة في عمليات التكييف فيمكن أن يصل فيها تركيز الرادون لمستويات خطيرة. كذلك، تعتبر بعض مصادر المياه الجوفية مصدرا للرادون حيث يكون الرادون ذائبا في هذه المياه وينبثق عنها عند استخدام المياه خاصة في الحمامات. كما تتميز بعض مصادر الغاز الطبيعي المستخدم في المنازل بوجود تراكيز عالية من غاز الرادون تتصاعد إلى الجو عند احتراق ذلك الغاز. ويمكن أن يصل تركيز الرادون في بعض الأماكن المغلقة إلى قيم تزيد على 100000 بكرل/ متر مكعب من الهواء، في حين أن تركيزه في الهواء الطلق يتراوح بين عدد قليل من البكرل وعدد قليل من عشرات البكرل في المتر المكعب (5– 50 بكرل/ م^3).

ويدخل الرادون جسم الإنسان مع هواء التنفس ويمكن أن ينتقل إلى الدم أو يؤثر مباشرة على الرئتين. وتتمثل مخاطر الرادون في أنه مصدر لجسيمات ألفا فضلا عن النويدات الوليدة المشعة التي تنتج عن تفككه. ويبين جدول (10–4) قيم تراكيز الرادون المتوسطة والموزونة عالميا طبقا لكثافة السكان وأنماط التهوية، وكذلك تركيز النويدات الوليدة المتوازنة مع الرادون مثل البولونيوم 214 والبولونيوم 210 وغيرها، حيث تشكل هذه النويدات الإسهام الأكبر في المخاطر على الإنسان.

من هذا يتضح أن غاز الرادون يشكل الإسهام الأكبر في الجرعة الفعالة التي يتعرض لها الإنسان من المصادر المشعة الطبيعية،

حيث تمثل جرعة التعرض للرادون بمفردها حوالي 50% من إجمالي الجرعة التي يتعرض الإنسان لها سنويا من جميع المصادر الطبيعية.

وهكذا، يتعرض الإنسان لجرعة طبيعية من الإشعاعات ناتجة عن البيئة التي يعيش فيها. وتختلف هذه الجرعة باختلاف خط عرض المكان وارتفاعه عن سطح البحر وطبيعة التربة ونوع المسكن وعدة عوامل أخرى كثيرة. ويبين جدول (10-5) الجرعات المكافئة الناتجة عن المصادر الطبيعية:

جدول (10-4): متوسطات تركيز غاز الرادون ونويداته الوليدة المتوازنة والجرعات الفعالة الناتجة عن هذه التراكيز

النويدة	الموقع	التركيز (بكرل/م^3)		الجرعة الفعالة السنوية(ميكروسيفرت)	
		غاز	نويدات متوازنة	غاز	نويدات متوازنة
رادون 222	خارج المباني	10	8	3	130
	داخل المباني	40	16	48	1000
متوسط الجرعة الفعالة السنوية (ميكروسيفرت) حوالي 1200					
رادون 220	خارج المباني	10	0.1	1.9	1.8
	داخل المباني	3	0.3	2.3	67
متوسط الجرعة الفعالة السنوية (ميكروسيفرت) حوال : 73					

وهكذا، يتضح أن غاز الرادون يشكل الإسهام الأكبر في الجرعة الفعالة التي يتعرض لها الإنسان من المصادر الإشعاعية الطبيعية حيث تمثل جرعة التعرض للرادون بمفردها في المتوسط 1.2 ميللي سيفرت/سنة، وهو ما يمثل حوالي 50% من إجمالي الجرعة التي يتعرض الإنسان لها سنويا من جميع المصادر الطبيعية.

وهكذا، يتعرض الإنسان لجرعة طبيعية من الإشعاعات ناتجة عن البيئة التي يعيش فيها. وتختلف هذه الجرعة باختلاف المكان وارتفاعه عن سطح البحر وطبيعة التربة ونوع المسكن وعدة عوامل أخرى كثيرة. ويبين جدول (10-5) الجرعات المكافئة الناتجة عن

المصادر الطبيعية طبقا لأحدث البيانات التي توصلت إليها اللجنة العلمية للأمم المتحدة المعنية بتأثيرات الإشعاعات المؤينة.

جدول (10−5): قيم الجرعات المتوسطة
من المصادر الطبيعية للإشعاعات المؤينة

مصدر التعرض	قيمة الجرعة الفعالة السنوية المتوسطة(ميللي سيفرت)	
	في المناطق العادية	في المناطق عالية الإشعاع
− الأشعة الكونية	0.38	2.00
− نويدات كونية في الهواء	0.01	0.01
− تعرض خارجي للإشعاعات الصادرة من التربة	0.46	4.30
− تعرض داخلي (بخلاف الرادون)	0.23	0.60
− رادون 222 ونواتجه	1.20	10.00
− رادون220 ونواتجه	0.07	0.10
− إجمالي الجرعة السنوية المتوسطة من المصادر الطبيعية	2.40	تعتمد كثيرا على المكان والارتفاع

10−2 المصادر الإشعاعية الاصطناعية

منذ عشرات السنين ظهرت عدة مصادر إشعاعية مصنعة، ساهمت في الجرعة الفعالة الجماعية لعموم البشر. وأهم هذه المصادر ما يلي:

10−2−1 الأشعة التشخيصية The diagnostic radiology

يتعرض الإنسان لجرعات إشعاعية معينة عند عمل صور تشخيصية بالأشعة السينية أو النووية مهما قل زمن التعرض. وتختلف

قيمة الجرعة باختلاف العضو ونوع الصورة المطلوبة ونوع جهاز الأشعة والفيلم الحساس المستخدم للتصوير وغيرها. وتؤكد اللجنة العلمية للأمم المتحدة، في تقاريرها الدورية، أن الأشعة التشخيصية هي المساهم الأعظم في الجرعة الفعالة الجماعية التي تتكبدها البشرية في العالم من المصادر التي صنعها البشر (man- made sources). وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة الجرعة الفعالة الجماعية السنوية لسكان العالم بما يتراوح بين 3–5 ملايين فرد سيفرت. وباستخدام معامل المخاطر الوارد في الفصول السابقة يتبين أن الأشعة السينية التشخيصية مسؤولة عن إحداث ما بين 30 حتى 50 ألف إصابة سرطانية قاتلة على مستوى العالم سنويا. ويبين جدول (10–6) مقادير الجرعات الفعالة التي يتكبدها الفرد في الفحص الواحد (أي اللقطة الواحدة) بالأشعة السينية في بعض دول العالم التي تتوفر فيها أنظمة لمراقبة التعرض الإشعاعي من الفحوص التشخيصية.

جدول (10–6): متوسط الجرعة الفعالة عن اللقطة الواحدة
للفحص بالأشعة السينية لبعض الأعضاء في بعض الدول

نوع الفحص	الدولة				
	فرنسا	إيطاليا	روسيا	الولايات المتحدة	الصين
الجمجمة	1.4	0.22	0.17	0.13	–
العمود الفقري	1.4	0.14	0.23	0.20	–
الصدر	0.28	0.18	0.36	0.07	0.21
البطن	2.6	1.9	1.50	0.56	4.5
الجهاز البولي	10.4	7.1	2.50	1.60	–
الحوض والفخذ	1.6	3.2	1.50	0.6	–

10–2–2 الأشعة العلاجية Therapeutic radiology

تتوقف قيمة الجرعة المكافئة على العضو الذي يتم علاجه والتعرض المطلوب له ونوع العلاج. وقد تزيد الجرعة الفعالة الناتجة عن العلاج الإشعاعي كثيرا بالمقارنة بجرعة التشخيص. ويوجد الآن في

العالم حوالي 18000 جهاز أشعة أو معجل نووي تستخدم للعلاج الإشعاعي لمرضى السرطان. إلا أنه ينبغي الإشارة إلى أن عدد الأشخاص الذين يخضعون للعلاج بالإشعاع محدود للغاية. وبذلك، تقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن الجرعة الفعالة الجماعية السنوية الناتجة عن العلاج الإشعاعي تبلغ حوالي 1.8 مليون فرد.سيفرت.

3-2-10 الطاقة النووية وصناعاتها

The nuclear Energy and industries

اتسع في السنوات الأخيرة استخدام الطاقة النووية لتوليد الكهرباء وفي تحريك السفن وحاملات الطائرات والغواصات العملاقة. ويوجد الآن في العالم أكثر من 450 مفاعلا نوويا لتوليد الطاقة الكهربائية موزعة في ثلاثين دولة. وتنشر هذه المنشآت كميات من المواد المشعة في البيئة ضمن ظروف التشغيل الطبيعية أو نتيجة للحوادث النووية. وفضلا عن ذلك، تبث مناجم اليورانيوم ومصانع معالجة الوقود النووي وإعادة معالجته بعد استهلاكه في المفاعلات كميات من المواد المشعة التي ساهمت في زيادة تعرض البشرية للإشعاع المؤين. إلا أنه نتيجة للالتزام الجيد بقواعد الأمان النووي فغن إسهام الصناعة النووية في التعرض الإشعاعي على المستوى العالمي مازال محدودا. فقد أسفر أكبر حادث نووي خلال أكثر من نصف قرن وهو حاث مفاعل تشرنوبل بأكرانيا عن جرعة فعالة جماعية تبلغ 600000 فرد. سيفرت، وهذه الأخيرة لا تتجاوز جزءا من سبعة أجزاء مما يتعرض له العالم من الفحوص التشخيصية سنويا.

4-2-10 النفايات المشعة The radioactive waste

هي تلك النفايات المتخلفة عن المفاعلات النووية أو المتبقية بعد استخدام المواد المشعة وتدخل الجرعة الفعالة الجماعية الناجمة عنها ضمن الجرعة الفعالة الجماعية للصناعات والطاقة النووية.

5-2-10 الغبار الذري The radioactive dust

خلال النصف الثاني من القرن الماضي (العشرين) نفذت عشرات بل مئات التفجيرات النووية في الجو خاصة في الفترة مابين عامي 1954م، 1962، وذلك قبل توقيع الاتفاقية الجزئية لحظر تجارب هذه التفجيرات في الجو عام 1963. ونتيجة لهذه التجارب تساقطت على سطح الأرض، خاصة في نصف الكرة الشمالي، كميات كبيرة من الغبار الذري الذي يتضمن مخلفات التفجيرات ونواتج الانشطار المشعة طويلة العمر. ومن أخطر هذه النواتج الكربون 14 والسيزيوم 137 والاسترونشيوم 90. ويصل إجمالي الجرعة الفعالة الجماعية من التفجيرات النووية التي تمت حتى الآن 30 مليون فرد.سيفرت، وصل للبشرية منها حتى الآن حوالي 15 %، وسوف يصل الباقي خلال مئات السنين القادمة.

ويبين جدول (10–7) الجرعات الفعالة السنوية للفرد الواحد، كمتوسط حسابي لجميع البشر على الأرض (حوالي 6 مليار نسمة)، الناتجة عن المصادر الاصطناعية المذكورة.

جدول (10–7): متوسط الجرعة الفعالة السنوية
للفرد عن بعض المصادر الاصطناعية

المصدر	متوسط الجرعة المكافئة السنوي (ميللي سيفرت)
الأشعة التشخيصية	0.70
أشعة العلاج	0.30
استخدام النظائر المشعة في الطب	0.02
النفايات المشعة	0.02
تساقط الغبار الذري	0.07
السكن بالقرب من محطة نووية	0.05
مصادر أخرى	0.04

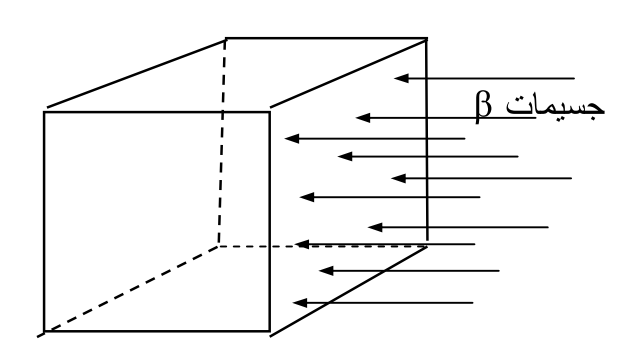
10–3 حساب معدل جرعة التعرض الخارجي من مصادر مشعة

10-3-1 حساب الجرعة لمصادر جسيمات بيتا

نفرض أن لدينا مصدرا رقيقا لجسيمات بيتا، حتى يمكن إهمال الامتصاص الذاتي داخل المصدر. ونفرض أن كثافة تدفق جسيمات بيتا (أو معدل سيولة هذه الجسيمات) في النقطة المطلوب تحديد معدل الجرعة عندها هي ϕ (جسيم /سم^2.ثانية)، وأن طاقة هذه الجسيمات هي E ميجا إلكترون فولت. عندئذ يكون تدفق الطاقة (أو معدل سيولة الطاقة) هو: $E\ \phi$.

فلو تصورنا مكعبا من الماء أو من نسيج مكافئ طول ضلعه 1 سم لكان تدفق الطاقة خلال وجه المكعب (شكل 10−2) هو:

$$E \phi \times (1\ cm^2) = \phi E$$



شكل (9−2)
تدفق الطاقة خلال مكعب من الماء طول ضلعه 1 سم

فإذا كانت طاقة جسيمات بيتا في حدود عدة ميجا إلكترون فولت يكون مدى هذه الجسيمات في النسيج في حدود 1 سم، أي أن الجسيمات تفقد كل طاقتها داخل هذا المكعب. وبذلك، يكون معدل انتقال الطاقة من جسيمات بيتا إلى حجم من النسيج مقداره 1 سم^3 هو ϕ E ميغا إلكترون فولت/ سم^2.ثانية.

وحيث أن كثافة الماء هي 1 غم/ سم^3 ،يكون معدل انتقال الطاقة من الجسيمات للمكعب هو $\Phi\phi$ E م.إ.ف/غم.ثانية.

وحيث أن 1 ميللي راد = 6.25×10^4 م.إ.ف/غم (راجع الفصل السابع)، يكون معدل الجرعة الممتصة بالميللي راد/ ثانية هو:

$$D^{*} = \phi E \ \ (MeV/ gm.sec) \div 6.25 \times 10^{4} \ (MeV/ gm. mrad)$$

$$= 1.6 \times 10^{-5} \phi E \quad mrad/ sec$$

وبالانتقال من الثانية إلى الساعة يكون المعدل D^{*} هو:

$$D^{*} = 1.6 \times 10^{-5} \ \phi E \ \times \ 3600$$

$$= 0.0576 \ \phi E \quad mrad/ hour$$

وحيث إن العامل المرجح لجسيمات بيتا هو $(W_R = 1)$، فإنه يمكن تحديد معدل الجرعة المكافئة D^{*} كالآتي:

$$H^{*} = 0.0576 \times \phi E \times 1$$

$$= 0.0576 \times \phi E \quad mrem/hour$$

أي أن:

$$H^{*} = 0.576 \phi E \quad \mu Sv/ hour \qquad (10-1)$$

وتجدر الإشارة إلى أن مصادر جسيمات بيتا تصدر جسيماتها بطاقات مستمرة تبدأ من الصفر وتنتهي عند القيمة القصوى. لذلك، فإنه يجب استخدام القيمة المتوسطة لطاقة هذه الجسيمات. وتختلف هذه القيمة المتوسطة من مصدر لآخر. ويبين جدول (10–8) بعض الخصائص لبعض مصادر جسيمات بيتا الشائعة الاستخدام، حيث تظهر القيمة المتوسطة للطاقة لهذه المصادر.

جدول (10–8): بعض مصادر جسيمات بيتا وأهم خصائصها

الخاصية	كربون 14	كبريت 35	كالسيوم 45	فسفور 32	سترنشيوم 90
العمر النصفي	5730	87 يوما	165	14.3يوم	28.1سنة
الطاقة القصوى (م.إ.ف)	سنة	0.167	يوما	1.701	2.24
الطاقة المتوسطة(م.إ.ف)	0.154	0.049	0.254	0.70	0.93
المدى في الهواء (سم)	0.050	30	0.077	600	870
المدى في الماء (سم)	30	0.032	60	0.8	1.1
السمك النصفي في الماء (سم	0.029	0.002	0.06	0.10	0.14
	0.0022	5	0.0048		
نسبة امتصاص الطاقة في طبقة الجلد الميت الخارجي	%89	%84	%63	%5	%3

مثال:

احسب معدل الجرعة الممتصة وكذلك المكافئة التي تنتج عن جسيمات بيتا، إذا علمت أن تدفق هذه الجسيمات هو 500 جسيم/سم^2. ثانية وأن طاقتها المتوسطة 0.7 م.إ.ف.

الحل:

يحسب معدل الجرعة الممتصة D^* بدلالة معدل السيولة والطاقة المتوسطة (بالميغا إلكترون فولت) من العلاقة:

$$D^* = 0.0576 \times \phi E \text{ (MeV)}$$
$$= 0.0576 \times 500 \times 0.7$$
$$= 20.16 \quad \text{mrad/h}$$

كما يحسب معدل الجرعة المكافئة من الجرعة الممتصة والعامل المرجح لجسيمات بيتا بالعلاقة:

$$H^* = D^* \times W_R$$
$$= 20.16 \times 1$$
$$= 20.16 \quad \text{mrem/ h} = 201.6\ \mu\text{Sv/h}$$

مثال:

لديك مصدر فسفور 32 رقيق نشطه الإشعاعي 2 ميللي كوري. احسب معدل الجرعة الممتصة تحت طبقة الجلد الميت على مسافة 1م من هذا المصدر (أهمل الامتصاص في الهواء)

الحل:

نحسب أولا كثافة تدفق الجسيمات ϕ (أو معدل السيولة) بدلالة النشاط الإشعاعي للمصدر ومساحة سطح الكرة التي يوجد المصدر في مركزها والتي يبلغ نصف قطرها $R = 1$ m كالآتي:

$$\phi = S / 4\pi R^2$$
$$= 2 \times 3.7 \times 10^7 / 4 \times 3.14 \times 100 \times 100$$
$$= 589 \quad \text{particles/cm}^2\text{.sec}$$

وحيث أن مقدار الجزء الممتص من طاقة جسيمات بيتا في طبقة الجلد الميت هو 5 % يكون مقدار الجزء المتغلغل من الطاقة 95 %

وحيث أن متوسط طاقة جسيمات بيتا لمصدر الفسفور هي 0.7 م.إ.ف، يكون معدل الجرعة الممتصة هو:

$$D^* = 0.0576 \times \phi E$$
$$= 0.0576 \times 589 \times 0.7 \times 0.95$$
$$= 22.56 \quad \text{mrad}$$

مثال:

احسب معدل الجرعة الممتصة الناتجة عن مصدر بيتا، إذا علمت أنه عند تسجيل جسيمات بيتا بواسطة عداد غايغر ميولر ذو النافذة كان معدل العد هو 40000 جسيم/دقيقة، وأن قطر النافذة هو 3سم، وأنه يمكن اعتبار متوسط طاقة هذه الجسيمات 1 م.إ.ف.

الحل :

نحسب أولا مساحة النافذة A :

$$A = \pi r^2$$
$$= 3.14 \times (1.5)^2 = 7.07 \quad cm^2$$

وعند إهمال الامتصاص في النافذة يمكن إيجاد كثافة التدفق ϕ عند النافذة كالآتي:

$$\phi = S / A$$
$$= 40000 / 7.07 = 5658 \quad \text{particles/ } cm^2.\text{ Minute}$$
$$= 5658 / 60 = 94.3 \quad \text{particles/ } cm^2.\text{sec}$$

وبالتالي يتم حساب معدل الجرعة الممتصة:

$$D^* = 0.0576 \times \phi E$$
$$= 0.0576 \times 94.3 \times 1$$
$$= 5.46 \quad \text{mrad/h}$$

ويجب الإشارة إلى أن معدل الجرعة الممتصة أو المكافئة يضعف كلما زادت المسافة، ليس بسبب قانون التربيع العكسي فحسب، ولكن كذلك نظرا لامتصاص بعض جسيمات بيتا في طبقة الهواء المتزايدة السمك. ونظرا لاعتماد الامتصاص على طاقة الجسيمات فإنه يصعب وضع علاقة بسيطة بين معدل الجرعة والمسافة، ولكن يمكن استخدام العلاقة التقريبية التالية لتحديد معدل الجرعة الممتصة (بالميللي راد/ ساعة)، عندما يعطى النشاط الإشعاعي S للمصدر بالميغا بكرل والمسافة d بالمتر والطاقة بالميغا إلكترون فولت.

$$D^* = 0.5 \; S \; E / d^2 \qquad (10\text{-}2)$$

10−3−2 حساب معدل الجرعة لإشعاعات جاما

إذا كانت كثافة تدفق (أي معدل سيولة) إشعاعات جاما هي ϕ فوتون/سم^2.ثانية، وكانت طاقة هذه الفوتونات ثابتة وتساوي E ، يكون تدفق الطاقة هو ϕE. وعند اجتياز هذه الطاقة لوحدة المسافات من الوسط المادي ينتقل جزء من الطاقة إلى هذا الوسط. وتعتمد كمية الطاقة المنتقلة للوسط على طاقة إشعاعات جاما الساقطة وعلى نوع هذا الوسط. ولتحديد كمية الطاقة المنتقلة لوحدة الحجم من جسم الإنسان يمكن استخدام البيانات الواردة في جدول (10−9) الذي يبين قيمة السمك النصفي (بالسم) ومعامل الامتصاص الكتلي (بالسم^2/غم) لكل من الأنسجة العضلية والعظام البشرية (لاحظ أن معامل امتصاص الطاقة لأشعة جاما يقل قليلا عن معامل التوهين الذي تعرفنا عليه في الفصل الثالث. اشرح لماذا؟).

فإذا كانت طاقة إشعاعات جاما مساوية 1م.إ.ف، يكون معامل الامتصاص الكتلي (انظر الجدول) في النسيج العضلي هو 0.031 سم^2/جم. وحيث أن النسيج العضلي يكافئ الماء تقريبا وأن كثافة الماء هي 1جم/سم^3 تكون الطاقة المنتقلة لوحدة الحجم من جسم الإنسان هي:

$$\xi = 0.031 \times \phi E \;\; (\text{MeV/ cm}^3 \,.\, \text{sec})$$

وحيث أن كثافة النسيج البشري هي تقريبا ا جم/سم^3 تكون الطاقة المنتقلة لكل سم^3 من هذا النسيج هي:

جدول (10–9): العلاقة بين طاقة إشعاعات جاما والسمك النصفي للأنسجة والعظام البشرية

الطاقة م.إ.ف	السمك النصفي		معامل الامتصاص الكتلي	
	نسيج عضلي (سم)	عظام (سم)	نسيج (سم2/جم)	عظام (سم2/جم)
0.01	0.13	0.019	4.87	19.20
0.02	0.95	0.14	0.533	2.46
0.03	2.02	0.41	0.154	0.72
0.04	2.78	0.78	0.070	0.304
0.05	3.19	1.15	0.043	0.161
0.06	3.54	1.45	0.033	0.100
0.08	3.84	1.88	0.026	0.054
0.1	4.09	2.14	0.026	0.039
1.0	9.90	5.58	0.031	0.030
10.0	31.3	16.3	0.016	0.016

$$\xi = 0.031 \times \phi E \ \ (\text{MeV/ gm . sec})$$

وحيث أن 1 ميللي راد = 6.25×10^4 م.إ.ف/جم، يكون معدل الجرعة الممتصة بالميللي راد/ثانية هو:

$$D^* = 0.031 \times \phi E / 6.25 \times 10^4$$

$$= 4.96 \times \phi E \times 10^{-7} \ \ \text{mrad/sec}$$

$$= 4.96 \times \phi E \times 10^{-7} \times 3600$$

$$D^* = 0.00179 \ \phi E \ \ \text{mrad/hour} \qquad (10\text{-}3)$$

وحيث أن المعامل المرجح لإشعاعات جاما يساوي 1 تحسب الجرعة المكافئة بنفس العلاقة، أي أن:

$$H^* = 0.00179 \ \phi E \qquad \text{mrem/hour}$$

$$= 0.0179 \ \phi E \quad \mu Sv/hour \quad (10\text{-}4)$$

وفي حالة المصادر النقطية يحسب التدفق ϕ من العلاقة المعروفة:

$$\phi = S / 4\pi R^2$$

وبالتعويض عن في العلاقة (10−4) يكون معدل الجرعة المكافئة هو:

$$H^* = 0.0179 \ S \ E / 4\pi R^2 \quad (\mu Sv / hour)$$

فإذا عبرنا عن النشاط الإشعاعي للمصدر S بالميغابكرل، وعن الطاقة E بالميغا إلكترون فولت، وعن المسافة d بين المصدر والنقطة المعنية بالمتر، يكون معدل الجرعة المكافئة بالميكروسيفرت/ساعة هو:

$$H^* = 0.0179 \times 10^6 \times S \ E / 4 \times 3.14 \times 10^4 \times R^2$$

أي أن:

$$H^* = 0.142 \times S \ E / R^2 \quad (10\text{-}5)$$

ونظرا لاختلاف معامل الامتصاص لأشعة جاما باختلاف كل من طاقة هذه الإشعاعات ونوع النسيج (نسيج عضلي أو عظام)، لذا فإنه يمكن استخدام العلاقة :

$$H^* = S \ E / 6 \ d^2 \quad \mu Sv / h \quad (10\text{-}6)$$

لإيجاد معدل الجرعة المكافئة بالميكروسيفرت/ساعة. وهذه العلاقة الأخيرة تعطي معدلا يزيد بمقدار 17 % عن العلاقة (10−5) السابقة.

وهاتان العلاقتان الأخيرتان صحيحتان عندما يصدر النظير المشع فوتونات بطاقة واحدة وعندما يكون عدد هذه الفوتونات مساويا للنشاط الإشعاعي للمصدر. إلا أنه من المعلوم أن النظائر المشعة يمكن أن تصدر فوتونات جاما بأكثر من قيمة واحدة للطاقة ويقال إن النظير يصدر عددا من خطوط جاما بطاقة محددة لكل خط. فضلا عن ذلك يتميز كل خط من الخطوط جاما بنسبة محددة من الانبعاث منسوبة للنشاط الإشعاعي للمصدر. ويطلق على هذه النسبة المعامل f لهذا

الخط. والمعامل f للخط المعين هو عبارة عن نسبة عدد فوتونات جاما المنطلقة بالطاقة المحددة للخط لكل 100 تفكك من تفككات النظير للجيل الأول. فعلى سبيل المثال عندما تتفكك 1000 نواة سيزيوم 137 من خلال التفكك البيتاوي إلى الباريوم 137 ينبعث من هذا العدد من نوى الباريوم 852 فوتونا بطاقة 662 ك.إ.ف. لذلك يقال أن القيمة f لهذا الخط هي 0.852 أي85.2 %. كذلك، فإنه عندما يتفكك الكوبلت 60 للنيكل 60 يصدر الأخير خطين من خطوط جاما، بطاقتين هم 1173 ، 1332 ك.إ.ف وبنسب f تساوي 100% للأول، 99.9 % للثاني.

وعندما يؤخذ في الحسبان وجود أكثر من خط من خطوط جاما للنظير المعين بنسب تفرع f مختلفة، تتخذ العلاقة (10−5) الصورة التالية:

$$H^* = 0.142 \, (S / R^2) \sum_i f \times E_i \qquad (10\text{-}7)$$

10−3−3 معامل جاما النوعي The gamma specific factor

لا يتطلب الأمر عند إيجاد معدل الجرعة بالعلاقة (10−7) معرفة النشاط الإشعاعي للمصدر والبعد عن النقطة المعنية فحسب، وإنما يتطلب كذلك معرفة بعض البيانات النووية عن النظير المصدر لإشعاعات جاما وتحديدا طاقات الخطوط f والنسبة (يطلق عليها في بعض المراجع بالخطأ نسبة التفرع).

لذلك، فإنه قد تم حساب معامل عرف باسم معامل جاما النوعي Γ للنظير المعين. ويعرف هذا المعامل فيزيائيا وفقا للنظام المعياري الدولي للوحدات بأنه معدل الجرعة من مصدر جاما، يبلغ نشاطه الإشعاعي ميغا بكرل واحد في نقطة تبعد متر واحد عن المصدر. كما يعبر عن هذا المعامل رياضيا بالعلاقة:

$$\Gamma \equiv = 0.142 \sum_i f \times E_i \qquad (10\text{-}8)$$

وعندما يتم التعبير عن النشاط الإشعاعي للمصدر بالميغا بكرل تكون وحدة قياس معامل جاما النوعي في العلاقة السابقة هي

(ميكروسيفرت/ساعة) لكل (ميغابكرل/متر مربع). وبمقارنة العلاقتين السابقتين (10–7)، (10–8) فإنه يتبين سهولة حساب معدل الجرعة المكافئة أو الفعالة، بوحدة ميكرو سيفرت/ساعة، عند معرفة معامل جاما النوعي من العلاقة:

$$H^* = \Gamma \times S / R^2 \qquad (10\text{-}9)$$

ويبين جدول (10–10) معامل جاما النوعي لبعض النظائر المشعة واسعة الاستخدام في المجالات الصناعية والطبية.

جدول (10–10): معامل جاما النوعي لبعض النظائر المشعة

النظير	معامل جاما النوعي	النظير	معامل جاما النوعي
صوديوم 22	0.324	ثاليوم 170	0.034
كوبلت 60	0.356	إيريديوم 192	0.0130
تكنيشيوم 99	0.022	ذهب 198	0.063
يود 131	0.059	راديوم 226	0.224

مثال:

احسب معدل الجرعة المكافئة الناتج على مسافة قدرها 150 سم من مصدر سيزيوم 137 نشاطه الإشعاعي 20 كيوري، إذا علمت أن طاقة إشعاعات جاما للمصدر هي 662 كيلو إلكترون فولت.

الحل:

النشاط الإشعاعي للمصدر بالميغابكرل هو:

$$S = 20 \times 3.7 \times 10^{10} / 1 \times 10^{6} = 7.4 \times 10^{5} \quad \text{MBq.}$$

طاقة إشعاعات جاما بالميغا إلكترون فولت هي:

$$E = 662 / 1000 = 0.662 \quad \text{MeV}$$

وباستخدام العلاقة (10–5) يكون معدل الجرعة المكافئة:

$$H^* = 0.142 \times 7.4 \times 10^{5} \times 0.662 / (1.5)^2$$

$$= 30917 \quad \mu\text{Sv/h}$$

$\approx 31 \quad mSv/h$

وباستخدام العلاقة (10−6) يكون المعدل هو:

$H^* = 36287 \quad \mu Sv/h \quad \approx 36.3 \quad mSv/h$

مثال:

احسب معدل الجرعة المكافئة على بعد مترين من مصدر كوبلت 60 نشاطه الإشعاعي 1 كيوري، إذا علمت أن كل تفكك لنواة كوبلت 60 يصدر فوتونين أحدهما بطاقة 1.173 والآخر بطاقة1.332 م.إ.ف.

الحل:

النشاط الإشعاعي للمصدر بالميغابكرل هو:

$S = 1 \times 3.7 \times 10^{10} / 1 \times 10^{6} = 3.7 \times 10^{4} \quad MBq.$

معدل الجرعة المكافئة للطاقة 1.173 هو:

$H^* = 0.142 \times 3.7 \times 10^{4} \times 1.173 / (2)^2$

$= 1541 \quad \mu Sv/h$

معدل الجرعة للطاقة 1.332 م.إ.ف هو:

$H^* = 0.142 \times 3.7 \times 10^{4} \times 1.332 / (2)^2$

$= 1750 \quad \mu Sv/h$

معدل الجرعة الكلي:

$H^*_t = 1541 + 1750 = 3291 \quad \mu Sv/h$

$= 3.29 \quad mSv/hour$

ويمكن حساب نفس المعدل باستخدام معامل جاما النوعي للكوبلت مباشرة باستخدام العلاقة (10−9)، حيث يكون:

$H^* = \Gamma \times S / R^2$

$= 0.356 \times (3.7 \times 10^{10} \times 10^{-6}) / (2)^2$

$= 3293 \quad \mu Sv/h \quad = 3.29 \quad mSv/h$

مثال:

احسب معامل جاما النوعي لنظير الكوبلت 60 إذا علمت أن النيكل 60 (النواة الوليدة للكوبلت) يصدر فوتونات جاما بطاقتين هما 1173، 1332 ك.إ.ف وبنسبة تفرع تبلغ 100 % ، 99.9 % بالترتيب.

الحل:

باستخدام العلاقة (10–8) يكون معامل جاما النوعي للكوبلت هو:

$$= 0.142 \sum_i f \times E_i$$

$$= 0.142 (1 \times 1.173 + 0.999 \times 1.332)$$

$$= 0.356 \quad (\mu Sv/h).(m^2/MBq)$$

10– 4 العوامل المؤثرة على الجرعات الخارجية

ورد أن الأخطار الخارجية تنتج عن المواد والمصادر المشعة الموجودة خارج جسم الإنسان. وتنتج هذه الأخطار عن جميع أنواع الإشعاعات والجسيمات المؤينة، باستثناء جسيمات ألفا. فقدرة هذه الجسيمات على اختراق الهواء والطبقة الخارجية للجلد الميت محدودة للغاية. أما جسيمات بيتا والأشعة السينية وإشعاعات جاما والنيوترونات فتتميز بقدرة عالية على الاختراق ويمكنها الوصول إلى أي عضو أو نسيج في الجسم عدا جسيمات بيتا التي يصل عمقها في الجسم إلى مسافات تعتمد على طاقتها وتتراوح بين حوالي 0.3 وحتى حوالي 1.5 سم. لذلك، تعتبر جميع المصادر المشعة (باستثناء بواعث ألفا) بمثابة مصادر للأخطار الخارجية.

ويخضع التحكم في الأخطار الخارجية لثلاثة عوامل رئيسة هي:
امتداد الفترة الزمنية للتعرض، أو ما يعرف بمعامل الزمن.
المسافة بين المصدر المشع والنقطة المعنية
وجود دروع أو حواجز واقية بين المصدر والنقطة المعنية.

10-4-1 زمن التعرض

إن أبسط أسلوب للوقاية من الأخطار الإشعاعية الخارجية هو قضاء أقل فترة زمنية ممكنة في الأماكن التي توجد فيها الإشعاعات. فالجرعة الإشعاعية المتراكمة في عضو ما H أو في جسم الإنسان ككل E تتناسب طرديا مع كل من طول الفترة الزمنية t ومعدل الجرعة المكافئة H^* أو الفعالة E^* في مكان وجوده، أي أن:

$$E = E^* \times t \qquad (10\text{-}10)$$

وتسري هذه العلاقة بالنسبة لكل من الجرعة الممتصة أو المكافئة أو الفعالة.

مثال:

من المعروف أن الحد السنوي للجرعة الفعالة للعاملين هو 20 ميللي سيفرت/سنة، فإذا كان معدل الجرعة الفعالة في أحد المختبرات 50 ميكرو سيفرت/ساعة، فكم ساعة يستطيع الفني في هذا المختبر أن يمكث في الأسبوع؟.

الحل:

يحسب أولا حد الجرعة (D.L) الأسبوعي علما بأن السنة تحتسب 50 أسبوع عمل:

$$(D.L) = 20 \text{ mSv} / 50 \text{ week}$$
$$= 0.4 \text{ mSv/week}$$

وباستخدام العلاقة (10-10) يكون الزمن المسموح خلاله بالبقاء داخل المختبر في الأسبوع الواحد هو:

$$t = E / E^*$$
$$= 0.4 \times 10^{-3} / 50 \times 10^{-6}$$
$$= 8 \text{ hours/week}$$

مثال:

فني طب نووي يعمل خمسة أيام في الأسبوع بواقع ثمان ساعات يوميا في أحد مختبرات الطب النووي، فما هو الحد الأقصى لمعدل الجرعة الفعالة الذي يسمح به في هذا المختبر.

الحل:

عدد ساعات العمل الأسبوعي هي:

$$= 5 \text{ days} \times 8 \text{ hours/day} = 40 \text{ h.}$$

وحيث أنه تبين من المثال السابق أن حد الجرعة الفعالة الأسبوعي للعاملين هو 0.4 ميللي سيفرت/أسبوع، وبتطبيق العلاقة (10−10) يكون الحد الأقصى لمعدل الجرعة الفعالة في المختبر هو:

$$E_{max}^{*} = E / t$$

$$= 0.4 \times 10^{-3} / 40 \times 10^{-6} = 0.01 \ \text{mSv/h}$$

$$= 10 \ \mu\text{Sv/h}$$

وهكذا، يتبين أنه للوقاية من الأخطار الإشعاعية الخارجية يجب ألا يتجاوز زمن التعرض زمنا معينا يسهل تحديده بمعرفة معدل الجرعة المكافئة أو الفعالة في المكان المقصود. وكلما زاد معدل الجرعة في هذا المكان قل الزمن الذي يسمح بالبقاء خلاله داخل هذا المكان. وتعتبر مراقبة زمن وجود العاملين في الأماكن التي يزيد فيها معدل التعرض على 7.5 ميكرو سيفرت/ساعة أمرا ضروريا بالنسبة للعاملين بالإشعاع. والسبب في استخدام المعدل 7.5 ميكرو سيفرت بدلا من 10 هو أهمية وجود هامش أمان (حوالي 25 %) لتغطية احتمالات عدم الدقة في القياسات والمعايرات.

10−4−2 المسافة

ورد في الفصل السادس أن تدفق الجسيمات أو الإشعاعات (كثافة سيولة الجسيمات) الصادرة عن مصدر مشع على شكل نقطة صغيرة يتناسب تناسبا عكسيا مع مربع المسافة R بين هذا المصدر والنقطة المعنية . ولما كان معدل الجرعة الإشعاعية يتناسب تناسبا طرديا مع

تدفق الجسيمات أو الإشعاعات، فإنه يتضح أن معدل الجرعة يتناسب تناسبا عكسيا مع مربع المسافة بين المصدر والنقطة المعنية. بذلك، يرتبط معدل الجرعة (D_1^* أو H_1^* أو E_1^*) في نقطة معينة تبعد مسافة R_1 عن المصدر مع معدل الجرعة (D_2^* أو H_2^* أو E_2^*) عند نقطة أخرى تبعد مسافة R_2 عن نفس المصدر بالعلاقة التالية:

$$E_1^* \times R_1^2 = E_2^* \times R_2^2 \qquad (10\text{-}11)$$

وتجدر الإشارة إلى أن هذه العلاقة بين معدل الجرعة والمسافة تعتبر صحيحة للمصادر الصغيرة أو قليلة الامتداد، وتحديدا عندما يكون امتداد المصدر مهملا بالنسبة للمسافة بينه وبين النقطة المعنية. أما بالنسبة للمصادر الممتدة فلا تعتبر هذه العلاقة صحيحة إلا إذا كانت المسافة بين المصدر والنقطة المعنية أكبر بكثير من امتداد المصدر المشع.

وتعرف العلاقة (10−11) باسم قانون التربيع العكسي بين معدل الجرعة والمسافة. ويعني هذا القانون أنه عند زيادة المسافة للضعف يقل معدل الجرعة للربع (أي تربيع النصف)، وبزيادة المسافة إلى ثلاثة أضعاف يقل المعدل تسع مرات، وهكذا.

مثال:

إذا كان معدل الجرعة الفعالة الناتج عن مصدر كوبلت 60 في نقطة تبعد عنه 1 متر هو 6 ميللي سيفرت/ساعة، فما هو معدل الجرعة على مسافة 3 م من هذا المصدر؟.

الحل:

بتطبيق العلاقة (10−11) يكون المعدل عند النقطة البعيدة هو:

$$H_2^* = H_1^* \times (R_1^2 / R_2^2)$$
$$= 6 \times (1)^2 / (3)^2$$
$$= 0.67 \quad mSv/h$$

مثال:

إذا كانت الجرعة الفعالة عند مسافة قدرها 0.5 متر من مصدر سيزيوم 137 هو 2 ميللي سيفرت/ساعة، فما هي المسافة من المصدر التي تصبح عندها الجرعة مساوية 50 ميكروسيفرت؟.

الحل:

بتطبيق العلاقة (10−11) يكون:

$$R_2^2 = R_1^2 \times (E_1^* / E_2^*)$$

$$= (0.5)^2 \times (2 \times 10^{-3} / 50 \times 10^{-6}) = 10 \ m^2$$

وبأخذ الجذر التربيعي تكون المسافة المطلوبة هي:

$$R = (10)^{½} = 3.2 \ m$$

أي أن معدل الجرعة الفعالة ينخفض إلى 50 ميكروسيفرت عند الابتعاد عن المصدر لمسافة 3.2 متر.

10−4−3 الدروع (الحواجز) الواقية The shields

تعتبر الدروع والحواجز بين المصدر المشع والنقطة المعنية من أهم وسائل الوقاية من أخطار التعرض الخارجي. ففي بعض الأحيان يكون النشاط الإشعاعي للمصدر كبيرا، بحيث لا يمكن الاقتراب منه حتى عشرات وربما مئات الأمتار، وبالتالي فإنه لا يمكن تنفيذ الأعمال والمهام الواجبة عليه. كذلك فإن الاعتماد على عاملي المسافة والزمن يتطلب وجود مسؤول وقاية متفرغ بصفة مستمرة على رأس العمل حتى لا يتجاوز العاملون الفترات المقررة لوجودهم داخل المكان المعين.

لذلك، توضع المصادر المشعة ذات النشاط الإشعاعي المرتفع نسبيا داخل دروع أو قلاع واقية. ويتوقف نوع مادة الدرع وسمكه على نوع الإشعاعات وطاقاتها والنشاط الإشعاعي للمصدر، وكذلك على معدل الجرعة المحددة خارج هذا الدرع.

وبالنسبة لمصادر جسيمات ألفا فإن هذه المصادر لا تتطلب أي نوع من الدروع، طالما أنها لا تصدر سوى هذه الجسيمات، حيث أنها تمتص في طبقة من الهواء لا يتجاوز سمكها 4 سم.

9-4-3-1 دروع مصادر بيتا

ورد في الفصل الثالث أن جسيمات بيتا تتفاعل مع المادة بأسلوبين: هما التأيين والإثارة وهو نمط التفاعل السائد عند الطاقات المنخفضة لهذه الجسيمات وإصدار إشعاعات الانكباح (أي الأشعة السينية) ويكون هو النمط السائد عند الطاقات العالية للجسيمات. كذلك، تبين أن كمية الأشعة السينية الناتجة عن تفاعل هذه الجسيمات مع المادة تزداد بزيادة العدد الذري Z للمادة المتفاعلة وبزيادة طاقة الجسيمات.

لهذا السبب تعتبر المواد ذات العدد الذري Z الصغير مثل البرسبكس perspex أو الألومنيوم من أنسب المواد لعمل دروع مصادر جسيمات بيتا حتى يمكن خفض كمية الأشعة السينية المتولدة لأكبر حد ممكن. ومع ذلك فإن استخدام هذه المواد الخفيفة كدروع لبواعث جسيمات بيتا لا يكفي للوقاية من أخطار هذه المصادر. فرغم أنه يكفي عمل درع بسمك حوالي 0.3 سم حتى 1.3 سم (تبعا للطاقة القصوى لجسيمات بيتا) إلا أن الأشعة السينية المنبعثة من الدرع بسبب تفاعل الجسيمات مع مادته يمكن أن تمثل مخاطر جسيمة. لهذا السبب يجب أن يحاط درع جسيمات بيتا من الخارج بدرع آخر للوقاية من الأشعة السينية المتولدة على الدرع الأول.

وقد يعتقد البعض أنه يمكن التعامل مباشرة مع مصادر بيتا دون وجود درع (أي السافرة)، حيث أنها لا تشكل خطورة خارجية كبيرة مثل إشعاعات جاما أو النيوترونات، نظرا لقدرتها المحدودة نسبيا على اختراق الهواء. إلا أن هذا الاعتقاد غير صحيح، حيث أن مدى هذه الجسيمات يمكن أن يصل عدة أمتار كثيرة تزيد بزيادة طاقة الجسيمات. فضلا عن ذلك فإنه يكفي للتدليل على مدى خطورة هذه الجسيمات حساب معدل الجرعة المكافئة من مصدر بيتا صغير، يبلغ نشاطه

الإشعاعي 1 ميغا بكرل، يصدر جسيمات بيتا بطاقة متوسطة مقدارها 0.6 ميغا إلكترون فولط على مسافة 3 سم من المصدر، حي يبلغ هذا المعدل 0.3 غراي/ساعة.

وقبل التعرف على كيفية حساب سمك الدرع اللازم لمصدر جسيمات بيتا المعين ينبغي الإشارة إلى أن سمك هذا الدرع لا يعتمد إطلاقا على مقدار النشاط الإشعاعي للمصدر وإنما يعتمد فقط على الطاقة القصوى لهذه الجسيمات وعلى نوع مادة الدرع. فالدرع الذي يكفي للوقاية من مصدر ذي نشاط إشعاعي 1 ميغابكرل يكفي بدوره للوقاية من مصدر آخر يبلغ نشاطه الإشعاعي آلاف وملاين الميغا بكرل. وهذه الخاصية تميز دروع جسيمات بيتا دون غيرها. فسوف يتبين فيما بعد أن دروع الأشعة السينية أو إشعاعات جاما أو النيوترونات يزيد سمكها زيادة مطردة بزيادة النشاط الإشعاعي للمصدر.

حساب عدد فوتونات الأشعة السينية المتولدة عن درع مصدر بيتا

حيث أنه يلزم وجود درع آخر للأشعة السينية المنبعثة من الدرع الأول لجسيمات بيتا فإنه ينبغي معرفة عدد فوتونات الأشعة السينية المنبعثة عن درع هذه الجسيمات. وقبل حساب هذا العدد يجب معرفة نسبة الطاقة المتحولة F من جسيمات بيتا كطاقة إشعاعية في صورة أشعة سينية. ويمكن حساب هذه النسبة بدقة عالية عند معرفة العدد الذري لمادة الدرع Z والطاقة القصوى E_{max} الصادرة عن المصدر المعين، وذلك باستخدام العلاقة التالية:

$$F = 0.035 \times Z \times E_{max} \quad \% \qquad (10\text{-}13)$$

وهذه العلاقة تعكس الحقيقة التي سبق الإشارة إليها والتي تفيد بأنه كلما زادت الطاقة القصوى لجسيمات بيتا أو زاد العدد الذري للمادة المتفاعلة زادت بالتالي كمية الأشعة السينية المتولدة مع بقاء باقي الظروف ثابتة.

وبعد معرفة النسبة F وعدد جسيمات بيتا N_β المنبعثة من المصدر في الثانية، يمكن حساب عدد فوتونات الأشعة السينية N_x المتولدة بالعلاقة التالية:

$$N_x = F \times N_\beta / 3$$
$$= 0.00035 \times Z \times E_{max} \times N_\beta / 3 \qquad (10\text{-}13)$$

مثال:

مصدر فسفور 32 يبلغ نشاطه الإشعاعي ا كوري ويصدر جسيمات بيتا بطاقة قصوى مقدارها 1.71 ميغا إلكترون فولط، موجود داخل درع من الألومنيوم $(Z = 13)$، احسب عدد فوتونات الأشعة السينية المنبعثة من الدرع.

الحل:

بتطبيق العلاقة (10-13) يكون العدد هو:

$$N_x = 0.00035 \times Z \times E_{max} \times N_\beta / 3$$
$$= 0.00035 \times 13 \times 1.71 \times 3.7 \times 10^{10} / 3$$
$$= 9.6 \times 10^7 \text{ photons}$$

أي أن الدرع، في هذا المثال، يصدر في الثانية الواحدة 96 مليون فوتون من فوتونات الأشعة السينية. وعموما، تتوزع طاقة هذا العدد من الفوتونات من صفر حتى1.71 ميغا إلكترون فولت، حيث يكون طيف الأشعة السينية طيفا مستمرا. إلا أنه لأغراض الوقاية الإشعاعية تعتبر طاقة جميع هذه الفوتونات واحدة وهي الطاقة القصوى لجسيمات بيتا.

حساب سمك الدرع اللازم لمصدر جسيمات بيتا

يتم حساب سمك الدرع اللازم لنظير معين باعث لجسيمات بيتا بدلالة مدى هذه الجسيمات في مادة الدرع. ويحسب هذا المدى بدلالة

السمك الكتلي R الذي تعرفنا عليه في الفصل الثالث، والذي يعرف كحاصل ضرب السمك الطولي في كثافة المادة. وبالنسبة لجسيمات بيتا التي لا تزيد طاقتها على 2.50 ميغا إلكترون فولط، يمكن تحديد مداها الكتلي في المادة(بوحدة غرام/سم^2) بالعلاقة التالية:

$$R = 0.412 \times E_{max} (1.265 - 0.0954 \times \ln E_{max}) \qquad (10\text{-}14)$$

حيث ترمز للوغاريتم الأساس الطبيعي (وهو يساوي 2.71)

أما إذا زادت طاقة جسيمات بيتا على 2.50 ميغا إلكترون فولط

تصبح العلاقة (10-14) غير دقيقة، وتستخدم عندئذ العلاقة (10-15) التالية لحساب المدى الكتلي بنفس الوحدة:

$$R = 0.53 \times E_{max} - 0.106 \qquad (10\text{-}15)$$

وبعد حساب المدى الكتلي باستخدام المعادلة الملائمة للطاقة القصوى لطيف جسيمات بيتا يتم إضافة 10- 15 % إلى هذا المدي كهامش أمان . ويعتبر المدى الناتج بعد الإضافة هو سمك الدرع المطلوب من هذه المادة لذلك النظير. وعند الحاجة لحساب هذا السمك بالوحدة الطولية العادية، يتم قسمة السمك الكتلي على كثافة المادة.

مثال:

احسب السمك الكتلي للدرع اللازم لمصدر سترونشيوم 90 بحيث تمتص جميع جسيمات بيتا المنبعثة من ذلك المصدر داخل الدرع، ثم احسب السمك الطولي عند استخدام الألومنيوم (كثافته 2.7 غرام/سم^3) والبلكسغلاس (كثافته 1.18 غرام/سم^3).

الحل:

من المعروف أن نظير سترونشيوم 90 يصدر جسيمات بيتا بطاقة قصوى مقدارها 0.546 م.إ.ف، ثم يتحول بعد ذلك إلى نظير الإيتريوم 90 المشع بدوره لجسيمات بيتا ولكن بطاقة قصوى مقدارها 2.284 م.إ.ف. لذلك، يجب استخدام الطاقة القصوى للإيتريوم لأنها الأكبر، والدرع الذي

يصلح للطاقة الأكبر يصلح بدوره للطاقة الأصغر، والعكس غير صحيح. وحيث أن الطاقة القصوى للإيتريوم هي 2.284 م.إ.ف فإنه يجب استخدام العلاقة (10-14)، أي أن:

$$R = 0.412 x E_{max} x (1.265 - 0.0954 \ln E_{max})$$

$$= 0.412 x 2.284 x (1.265 - 0.0954 \ln 2.284)$$

$$= 1.116 \quad gm / cm^2$$

بعد ذلك يجب إضافة 15 % من هذا السمك الأخير كهامش أمان، وبذلك يكون السمك الكتلي المطلوب لنظير سترونشيوم 90 هو:

$$R^* = 1.116 x 1.15 = 1.283 \quad gm/ cm^2$$

ولحساب السمك الطولي من الألومنيوم يجب قسمة السمك الكتلي على كثافة الألومنيوم، أي أن سمك الدرع المطلوب من الألومنيوم هو:

$$X_{Al} = 1.283 / 2.7$$

$$= 0.475 \quad cm \approx 5 \quad mm$$

وسمك الدرع المطلوب حال استخدام البلكسغلاس هو:

$$X_{plex} = 1.283 / 1.18$$

$$= 1.087 \quad cm \approx 1.1 \quad cm$$

9-4-3-2 دروع الأشعة السينية وإشعاعات جاما

ورد في الفصل الثالث أنه عند مرور الأشعة السينية أو إشعاعات جاما خلال مادة ما فإنه يحدث توهين لعدد الفوتونات التي تجتاز سمكا من هذه المادة وفقا للقانون الأسي الذي يتخذ الصورة التالية:

$$I = I_0 \, e^{-\mu x}$$

حيث: I_0 أن هو عدد الفوتونات الساقطة على المادة، I هو عدد الفوتونات التي تجتاز سمكا من المادة مقداره x دون تفاعل، μ هو معامل التوهين الطولي للمادة عند طاقة الإشعاعات المقابلة.

وحيث أن معدل الجرعة الممتصة أو المكافئة أو الفعالة يتناسب تناسبا طرديا مع عدد الفوتونات، فإنه يمكن التعبير عن معدل الجرعة

الناتجة عن هذه الإشعاعات بعد اختراقها للدرع الذي يبلغ سمكه x بعلاقة مماثلة لعلاقة التوهين تتخذ الصورة التالية:

$$E^* = E_0^* \, e^{-\mu x} \qquad (10\text{-}16)$$

حيث E^* هو معدل الجرعة الفعالة بعد اجتياز درع يبلغ سمكه x ، E_0^* هو معدل الجرعة الفعالة في نفس النقطة في حالة عدم وجود الدرع، μ معامل يعرف باسم معامل امتصاص الطاقة. ويختلف هذا المعامل الأخير عن معامل التوهين الوارد في الفصل الثالث اختلافا محدودا

معامل امتصاص الطاقة μ

إن معامل التوهين الذي يعبر عن تناقص عدد الفوتونات كلما تغلغلت في المادة لا يعكس في الواقع كمية الطاقة التي تمتصها المادة عند تغلغل الإشعاعات فيها. فعند مرور الفوتون في المادة فإنه يمكن أن يفنى نتيجة العملية الكهروضوئية أو عملية إنتاج الزوج الإلكتروني البوزيتروني. وفي العملية الأولى يفقد الفوتون كل طاقته في المادة. أما في الحالة الثانية فرغم أن الفوتون يفنى وتنتقل طاقته للمادة إلا أن جزءا من هذه الطاقة قد يعود من جديد في صورة فوتون أو فوتوني الفناء. فعندما يفقد البوزترون طاقته فإنه يفنى مع أحد إلكترونات المادة وينطلق، نتيجة لذلك، فوتونين يحمل كل منهما طاقة تساوي 511 ك.إ.ف، وقد يخرج أحد هذين الفوتونين أو كلاهما من المادة دون تفاعل جديد. لذلك، يقال أن طاقة الفوتون قد لا تنتقل بالكامل للمادة. كذلك، فإنه في حالة تفاعل الفوتون مع المادة من خلال تشتت كمبتون فإن طاقة الفوتون لا تنتقل بالكامل إلى الإلكترون الحر وإنما ينتقل جزء منها ويتشتت الفوتون حاملا الجزء الباقي من الطاقة.

وحيث أن معدل الجرعة يعتمد على الطاقة المنقولة لوحدة الكتلة من المادة، لذلك فإنه يجب استخدام المعامل الذي يعين انتقال الطاقة من الإشعاعات للمادة وامتصاصها فيها، وهو ما يعرف بمعامل انتقال الطاقة. ويجدول هذا المعامل الأخير، عادة في المراجع للمواد، في

صورة معامل امتصاص الطاقة الكتلي الذي يساوي المعامل الخطي لامتصاص الطاقة مقسوما على كثافة المادة الممتصة. وفي جميع حسابات دروع الأشعة السينية وإشعاعات جاما يجب استخدام معامل امتصاص الطاقة بدلا من معال التوهين الوارد في الفصل الثالث.

وتجدر الإشارة إلى أن معامل امتصاص الطاقة يقل بنسبة محدودة (أي صغيرة) عن معامل التوهين للأسباب سالفة الذكر، وتختلف هذه النسبة باختلاف طاقة الإشعاعات.

الامتصاص الأسي للأشعة السينية وإشعاعات جاما

من حيث المبدأ يمكن استخدام علاقة الامتصاص الأسي للأشعة السينية وإشعاعات جاما (10–16) لحساب سمك الدرع اللازم لخفض الجرعة المكافئة أو الفعالة خارج الدرع للحد المطلوب. إلا أنه يجب الإشارة إلى أن سمك الدرع المحسوب وفقا لهذه العلاقة يكون غير كاف في الغالبية العظمى من الحالات، ولا تصلح هذه العلاقة للاستخدام إلا في الظروف المثالية غير الواقعية والتي تتمثل في الآتي:

أ– حزمة ضيقة جدا ومتوازية من الأشعة
ب– سمك الدرع صغير للغاية.

وعند تحقق هذين الشرطين فإنه يمكن حساب سمك الدرع بالعلاقة (10–16) أو باستخدام ما يعرف بالسمك النصفي $X_{1/2}$ أو السمك العُشري $X_{1/10}$. ويعرف السمك النصفي هنا على أنه "سمك المادة الذي يخفض الجرعة الإشعاعية إلى نصف مقدارها. ويجب أن يحسب هذا السمك باستخدام معامل امتصاص الطاقة (بدلا من معامل التوهين) وفقا للعلاقة المعروفة:

$$X_{1/2} = 0693 / \mu \qquad (10\text{-}17)$$

وهكذا، فإن الدرع أو الحاجز الذي يساوي سمكه سمكا نصفيا واحدا يخفض معدل الجرعة الإشعاعية إلى النصف. وإذا كان سمك

الدرع مساويا خمسة أضعاف السمك النصفي فإن هذا الدرع يخفض الجرعة بواقع 32 مرة، حيث أن $(2/1)^5 = (32/1)$، وعندما يكون سمك الدرع مساويا عشرة أضعاف السمك النصفي فإن هذا الدرع يخفض الجرعة بواقع 1024 مرة حيث أن $(2/1)^{10} = (1024/1)$، وهكذا.

ومعرفة السمك النصفي مفيد لإيجاد السمك المطلوب للدرع بطريقة سهلة وسريعة. ويبين جدول (10−11) قيم معامل الامتصاص الخطي μ بوحدة سم$^{-1}$ وقيم السمك النصفي بوحدة سم، لبعض المواد المستخدمة لعمل دروع واقية من الأشعة السينية وإشعاعات جاما، عند طاقات مختلفة.

جدول (10−11): قيم معامل الامتصاص والسمك النصفي لبعض الماد عند بعض الطاقات

خرسانة		رصاص		حديد		ماء		الطاقة (م.إ.ف)
$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	
0.012	57.8	0.0005	1340	0.0005	1330	0.155	4.48	0.01
1.75	0.397	0.012	58.2	0.27	2.60	4.20	0.65	0.1
3.09	0.224	0.42	1.65	0.53	1.32	15.0	0.069	0.5
4.62	0.150	0.90	0.77	1.47	0.47	19.0	0.07	1.0
6.48	0.107	1.45	0.48	1.82	0.38	20.0	0.034	1.5
7.97	0.087	1.80	0.39	2.10	0.33	22.5	0.031	2.0
9.62	0.072	1.40	0.50	2.48	0.28	27.5	0.025	5.0
12.8	0.054	1.28	0.54	3.01	0.23	32.5	0.022	10.0

السمك العشري:

هو ذلك السمك من المادة الذي يؤدي عند وضعه في طريق الإشعاعات إلى خفض الجرعة الإشعاعية الناتجة إلى جزء من عشرة أجزاء من قيمتها دون وجود الدرع، أي أن:

$$X_{1/10} = \ln 10 / \mu = 2.303 / \mu \qquad (10\text{-}18)$$

ومن هنا يتضح أن السمك العُشري أكبر من السمك النصفي بمقدار 3.32 ضعفا.

مثال:

مصدر كوبلت 60 موجود يؤدي إلى معدل جرعة فعالة مقداره 320 ميكروسيفرت/ساعة عند نقطة معينة من المصدر، احسب سمك درع الرصاص اللازم وضعه بين المصدر والنقطة لخفض معدل الجرعة إلى 10 ميكروسيفرت/ساعة.

الحل:

عدد مرات الخفض المطلوبة في معدل الجرعة هي:

$$320 / 10 = 32$$

وحيث أن:

$$32 = (2)^5$$

يكون عدد مرات السمك النصفي المطلوبة هو 5 . وحيث أن السمك النصفي للرصاص عند طاقة الكوبلت (1.332 ك.إ.ف هو 1.25 سم، يكون سمك الرصاص المطلوب هو:

$$X = 5 \times 1.25 = 6.25 \quad cm$$

مثال:

مصدر كوبلت 60 يبلغ نشاطه الإشعاعي 5000 كوري موضوع داخل قلعة كروية، احسب سمك الجدار اللازم للقلعة بحيث لا تتجاوز الجرعة الفعالة لعامل يمكث 35 ساعة أسبوعيا على مسافة 0.5 متر من المصدر حد الجرعة الأسبوعي، علما بأن السمك النصفي للرصاص وإشعاعات جاما من الكوبلت 60 هو 1.25 سم.

الحل:

يحسب أولا معدل الجرعة الفعالة من المصدر على بعد 0.5 م باستخدام العلاقة (10−7) أو (10−9) حيث يكون:

$E^* = 0.356 \times 5000 \times 3.7 \times 10^4 / (0.5)^2$

$= 2.63 \times 10^8 \ \mu Sv/h$

وحيث أنه قد سبق حساب حد الجرعة المسموح للعاملين وهو 400 ميكرو سيفرت/أسبوع، يكون المعدل المقابل للجرعة عند العمل 35 ساعة أسبوعيا هو:

$400 / 35 = 11.43 \ \mu Sv/h$

بذلك يسهل حساب عدد مرات التخفيض المطلوبةn، حيث تكون:

$n = 2.63 \times 10^8 / 11.43 = 2.3 \times 10^7$

وحيث أن هذا العدد الأخير هو عبارة عن 2 مرفوعة للأس 24.45 ، أي أن:

$2.3 \times 10^7 = (2)^{24.45}$

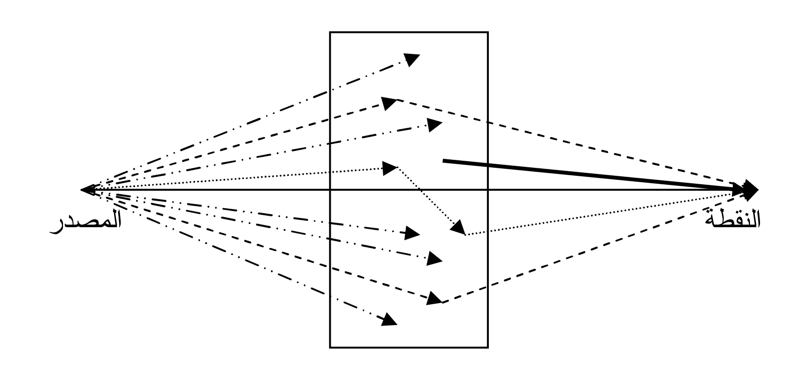
يكون سمك الدرع المطلوب هو:

$X = 24.45 \times 1.25 = 30.56 \ cm$

التراكم ودوره في حساب سمك الدرع

من حيث المبدأ يستحيل تحقيق المطلبين المذكورين في الفقرة السابقة والخاصين بوجوب أن تكون حزمة الأشعة الساقطة على الدرع حزمة ضيقة ومتوازية، وأن يكون سمك الدرع صغيرا. فقد تبين من المثال السابق أن سمك الدرع قد زاد على 30 سم من الرصاص، كما أن المصدر يصدر إشعاعاته في جميع الاتجاهات. ويؤدي هذان الوضعان إلى حدوث ما يعرف بالتراكم (Build up). ولإيضاح مفهوم التراكم يمكن الاستعانة بالشكل (10-3). فالإشعاعات تخرج من المصدر في جميع الاتجاهات وتمتص نسبة منها في الدرع وفقا لقانون التوهين الأسي، مثل جميع الأشعة المتقطعة المنقطة الخمسة على الشكل. ويمر الشعاع الذي يخترق الدرع ويصل مباشرة للنقطة المعنية والذي تحسب حالاته وفقا لقانون التوهين الأسي كذلك. أما الشعاعان المتقطعان فإنه رغم أنهما كانا متجهين بعيدا عن النقطة المعنية إلا أنهما سقطا على هذه النقطة بسبب تشتت كمبتون. كذلك فإن الشعاع المنقط قد عانى تشتتا مرتين

بسبب السمك الكبير للدرع، وسقط بدوره على النقطة المعنية. كذلك يمكن أن يؤدي تولد الأزواج داخل الدرع وتفاعل البوزترونات مع إلكترونات المادة إلى انطلاق فوتونات الفناء ذات الطاقة 511 ك.إ.ف نحو النقطة، مثل الشعاع المستمر المتولد في النصف الأعلى من الدرع.



شكل (10−3): توضيح مفهوم التراكم

وهكذا، فإنه نتيجة لوصول فوتونات إلى النقطة المعنية، بخلاف تلك التي تصل نفس النقطة بالقانون الأسي للتوهين، لم يعد ذلك القانون صالحا للتطبيق.

وهكذا، فإن التراكم ينتج في الغالبية العظمى من الظروف السائدة وهي الحزم العريضة من الإشعاعات والسمك الكبير نسبيا للدرع. وأما نمطا التفاعل المسؤولان عن حدوث التراكم فهما تشتت كمبتون وإنتاج الأزواج. لذلك يصبح دور التراكم كبيرا جدا عند الطاقات العالية لإشعاعات جاما.

ويمكن حساب عدد الفوتونات الكلية I_t التي تصل النقطة المعنية خلف الدرع، حيث يتكون هذا العدد من:

أ- مركبة مباشرة I_d تخترق سمك الدرع دون تفاعل.
ب- مركبة متشتتة I_s كانت فوتوناتها متجهة في الأصل بعيدا عن النقطة واتجهت بعد تشتت كمبتون إليها، أو تولدت فوتوناتها نتيجة فناء البوزترونات مع إلكترونتات مادة الدرع.

أي أن عدد الفوتونات الإجمالي هو:

$$I_t = I_d + I_s \qquad (10\text{-}19)$$

ويعرف معامل التراكم B على أنه النسبة بين العدد الكلي للفوتونات I_t التي تصل النقطة المعنية مباشرة من المصدر في وجود الدرع وبسبب التشتت أو التولد في مادة الدرع إلى عدد الفوتونات التي تخترق الدرع دون تفاعل I_d وتصل مباشرة للنقطة المعنية وفقا للقانون الأسي، أي أن:

$$B = I_t / I_d = (I_d + I_s) / I_d \qquad (10\text{-}20)$$

وتجدر الإشارة إلى أن معامل التراكم يمكن أن يتخذ قيما كبيرة قد تصل مئات وآلاف المرات. ومعنى هذا أن الدرع المحسوب على أساس التوهين الأسي لا يعتبر كافيا ويجب زيادة سمك الدرع لموازنة دور التراكم في زيادة معدل الجرعة.

مثال:

إذا علمت أن معامل التراكم في ظروف معينة وفي نقطة معينة بالنسبة لمصدر مشع محاط بدرع هو 5 ، ما هي نسبة الإشعاعات التي تصل النقطة وفقا للقانون الأسي؟، وما هي النسبة بسبب التراكم؟.

الحل:

باستخدام العلاقة (10-20)، واعتبار دائما بمثابة الوحدة (أي واحد صحيح) يكون:

$$B = 5 = (I_d + I_s) / I_d = (1 + I_s) / 1$$

ومنها يتبين أن تساوي 4 ، أي أن نسبة الإشعاعات المباشرة التي تصل النقطة هي:

$$(1/5) \times 100 = 20\ \%$$

والنسبة التي تصل بسبب التراكم هي:

$$(4/5) \times 100 = 80\ \%$$

وهكذا، فإنه عند احتساب التراكم B تصبح العلاقة (10–16) غير صالحة لحساب سمك الدرع المطلوب، وتتخذ العلاقة عندئذ الصيغة التالية:

$$E^{*} = B\ E_0^{*}\ e^{-\mu X} \qquad (10\text{-}21)$$

مثال:

في المثال قبل السابق حيث كانت شدة المصدر 5000 كوري، إذا علمت أن معامل التراكم يبلغ 32 مما هو السمك اللازم للدرع لتحقيق معدل الجرعة الفعالة المطلوب.

الحل:

يمكن إيجاد سمك الدرع الجديد بطريقتين. في الطريقة الأولى فإن معامل التراكم يؤدي إلى زيادة المعدل 32 ضعفا وبالتالي يجب توهين الجرعة 32 مرة. وحيث أن $(32) = (2)^5$ فإنه يجب إضافة سمك إضافي للدرع السابق يساوي خمسة أضعاف السمك النصفي، أي أن السمك الكلي يصبح:

$$X = 30.56 + 5 \times 1.25$$
$$= 36.81\ \ cm$$

والحل الآخر هو بالتطبيق المباشر للعلاقة(10–21) وحساب قيمة معامل الامتصاص μ بدلالة السمك النصفي، حيث يكون المعامل هو:

$$\mu = \ln 2 / X_{1/2} = 0.693 / 1.25 = 0.5544\ \ cm_{-1}$$

وبالتعويض عن قيم المعدلات ومعامل التراكم ثم أخذ لوغاريتم طرفي المعادلة للتخلص من الدالة الأسية يتم الحصول على علاقة خطية، وذلك كالآتي:

$$E^* = B\ E_0^*\ e^{-\mu x}$$
$$11.43 = 32 \times 2.63 \times 10^8 \times e^{-0.5544\,X}$$
$$1.358 \times 10^{-9} = e^{-0.5544\,X}$$
$$-20.417 = -0.5544\,x$$
$$x = 36.82 \text{ cm}$$

وهي نفس النتيجة السابقة.

10-4-3-3 دروع النيوترونات السريعة

درسنا في الفصل الثالث أن النيوترونات السريعة تفقد طاقتها أساسا عن طريق التشتت المرن على النوى الخفيفة. وقد ورد أنه يفضل استخدام مواد غنية بالعناصر الخفيفة كالهيدروجين لتهدئة النيوترونات. لذلك، فإنه عند عمل حواجز واقية من النيوترونات السريعة يجب أولا تهدئة هذه النيوترونات، وذلك باستخدام طبقة ذات سمك مناسب من الماء أو شمع البرافين لاحتوائهما على الهيدروجين بنسبة عالية. وقد وجد في (الفصل الثالث) أن متوسط عدد التصادمات اللازمة لتحويل النيوترون السريع إلى نيوترون حراري تبلغ حوالي 18-19 تصادما مع ذرات الهيدروجين. وعند معرفة متوسط المسار الحر للنيوترون في المادة المعينة فإنه يمكن حساب السمك المادة اللازم منها لتهدئة النيوترونات.

وبعد تحويل النيوترونات السريعة إلى حرارية يصبح من السهل امتصاصها وذلك باستخدام مادة ذات مقطع عرضي كبير لامتصاص النيوترونات الحرارية. وتستخدم مادة الكادميوم Cd لهذا الغرض، حيث أن المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات في الكادميوم كبير للغاية. ونتيجة للامتصاص النيوتروني تنطلق إشعاعات جاما طبقا للتفاعل:

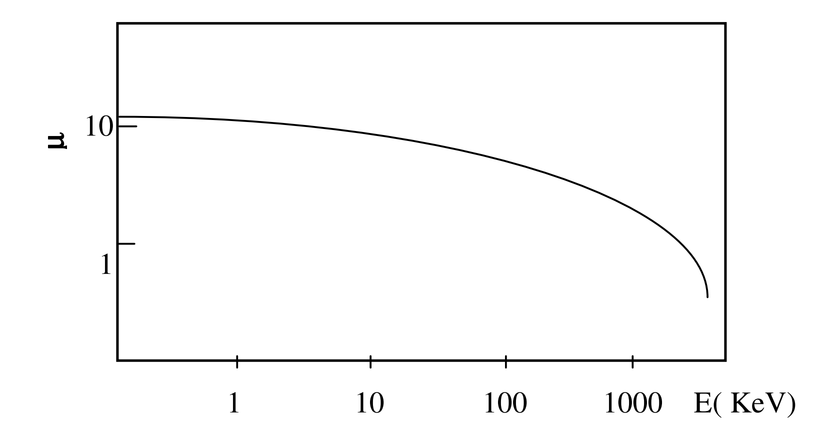
$$^{114}Cd + n \longrightarrow {}^{115}Cd + \gamma$$

وهكذا، فإنه عند عمل حواجز واقية من النيوترونات، يستخدم سمك من الماء أو شمع البرافين (في حدود 20 – 30 سم)، يليه شريحة رقيقة من مادة الكادميوم لامتصاص النيوترونات الحرارية ثم تغطى هذه

الشريحة الأخيرة بسمك من الرصاص أو الخرسانة المسلحة، وذلك لامتصاص إشعاعات جاما الناتجة.

وفي أغلب الأحيان، لا تتاح إمكانية استخدام شرائح الكادميوم لامتصاص النيوترونات الحرارية، عندئذ يمكن الاكتفاء باستخدام سمك كبير من الماء أو شمع البرافين. ويقوم الدرع بعملية التهدئة والامتصاص النيوتروني، حيث يتناقص عدد النيوترونات تبعا للقانون الأسي الوارد في البنود السابقة مع اختلاف قيمة معامل الامتصاص μ للنيوترونات عنه معامل الامتصاص لإشعاعات جاما. ويعتمد معامل الامتصاص النيوتروني اعتمادا كبيرا على طاقة النيوترونات وعلى نوع المادة الممتصة. ويبين شكل (10−4) كيفية تغير هذا المعامل بتغير طاقة النيوترونات وذلك لعنصر الهيدروجين عند وحدة الكثافة (أي عندما تكون كثافة الهيدروجين مساوية 1 جم/سم^3). فإذا كانت المادة المستخدمة للامتصاص النيوتروني عبارة عن مركب يحتوى على الهيدروجين كأحد العناصر المكونة لها فإنه يجب معرفة النسبة الوزنية للهيدروجين في هذا المادة. وتكون كثافة الهيدروجين ρ^* في هذا المركب هي عبارة عن حاصل ضرب كثافة المركب ρ في النسبة الوزنية C للهيدروجين في المركب، أي أن:

$$\rho^* = C \times \rho$$



شكل (10–4): معامل الامتصاص النيوتروني
عند وحدة الكثافة للهيدروجين كدالة من طاقة النيوترونات

وعندئذ يكون معامل الامتصاص النيوتروني الفعليμ^* هو عبارة عن حاصل ضرب كثافة الهيدروجين في المركب ρ^* في معامل الامتصاص عند وحدة الكثافة μ، أي أن:

$$\mu^* = \mu \times \rho^*$$

مثال:

مصدر نيوتروني يصدر نيوترونات سريعة بطاقة حوالي 7 ميغا إلكترون فولت وضع في مركز خزان ماء أسطواني الشكل. فإذا كان نصف قطر مقطع الأسطوانة 75 سم. فكم من المرات ينخفض التدفق النيوتروني عند السطح الأسطواني للخزان.

الحل:

من المعلوم أن النسبة الوزنية للهيدروجين في الماء (H_2O) هي:

$$1 : 9$$

أي أن النسبة الوزنية للهيدروجين C هي:

$$C = (1/9) \times 100 = 0.11 \ \%$$

وكثافة الهيدروجين في الماء تساوي كثافة الماء في النسبة الوزنية للهيدروجين، أي أن:

$$\rho^* = C \times \rho = 1 \times 011 \ \%$$
$$= 0.11 \quad gm/cm^{3\rho}$$

وبالرجوع للشكل(10–3) يلاحظ أن معامل الامتصاص للنيوترونات بطاقة 7 ميغا إلكترون فولت هو 0.76 سم$^{1-}$ عند وحدة الكثافة للهيدروجين. بذلك يكون معامل الامتصاص عند الكثافة الفعلية هو:

$$\mu^* = \mu \times \rho^*$$
$$= 0.76 \times 0.11 = 0.0836 \quad cm^{-1}$$

وباستخدام العلاقة (10−17) يمكن إيجاد قيمة السمك النصفي للهيدروجين في الماء، حيث يساوي:

$$X_{1/2} = 0.693 / \mu^*$$

$$= 0.693 / 0.0836 = 8.3 \quad cm$$

بذلك يكون عدد مرات السمك النصفي n في 75 سم هو:

$$n = 75 / 8.3 = 9.04 \quad (HVL)$$

بذلك يكون عدد مرات توهين التدفق النيوتروني هو:

$$(2)^{9.04} = 526 \quad times$$

وعند التعامل مع نيوترونات بطاقات مختلفة فإنه نظرا لاختلاف معامل الامتصاص باختلاف طاقة النيوترونات تصبح الأمور أكثر تعقيدا. عندئذ يمكن استخدام قيمة متوسطة لمعامل الامتصاص لهذه الطاقات عند وحدة الكثافة. ويبين جدول (10−12) معامل الامتصاص المتوسط للنيوترونات الناتجة عن الانشطار النووي لبعض العناصر.

جدول(10−12)
معامل الامتصاص لبعض المواد عند وحدة الكثافة

العنصر	معامل الامتصاصμ (سم^2/جم)
حديد	0.020
هيدروجين	0.612
أكسجين	0.041
كالسيوم	0.024
سليكون	0.295

مثال:

احسب مقدار التوهين لحاجز مائي سمكه 150 سم للنيوترونات الناتجة عن الانشطار النووي.

الحل:

من جدول (10–12) يتبين أن معامل الامتصاص للهيدروجين (عند وحدة الكثافة) هو 0.602 سم^2/جم. والنسبة الوزنية للهيدروجين في الماء تساوي 11% (راجع المثال السابق).

بذلك يكون معامل الامتصاص الفعلي للهيدروجين في الماء هو:

$$\mu^* = \mu \times \rho^*$$

$$= 0.612 \times 0.11 = 0.06622 \quad cm^{-1}$$

ومنه يكون السمك النصفي للهيدروجين في الماء هو:

$$X_{1/2} = 0.693 / 0.06622 = 10.47 \quad cm$$

ويكون عدد مرات السمك النصفي n في 150 سم هو:

$$n = 150 / 10.47 = 14.33 \quad (HVL)$$

وبالتالي يكون مقدار التوهين بواسطة هيدروجين طبقة الماء هو:

$$(2)^{14.33} = 20595 \quad times$$

ثم نقوم بإجراء نفس الحسابات بنفس الأسلوب بالنسبة لأكسجين الماء. فمن جدول (10–12) يتبين أن معامل الامتصاص للأكسجين في الماء عند وحدة الكثافة هو0.041 سم^2/جم. وحيث أن النسبة الوزنية للأكسجين في الماء هي 0.89 % يكون معامل الامتصاص الفعلي للأكسجين في الماء هو:

$$\mu^* = 0.041 \times 0.89 = 0.0365 \quad cm^{-1}$$

وبالتالي، يكون السمك النصفي للأكسجين في الماء هو:

$$X_{1/2} = 0.693 / 0.0365 = 18.99 \quad cm$$

ويكون عدد مرات السمك النصفي للأكسجين في الماء:

$$n = 150 / 18.99 = 7.9 \quad (HVL)$$

وبذلك يكون مقدار التوهين النيوتروني بواسطة الأكسجين في الماء هو:

$$(2)^{7.9} = 239 \quad times$$

وبالتالي يكون مقدار التوهين الإجمالي لعنصري الماء هو حاصل ضرب مقدار التوهين بواسطة الهيدروجين في مقدار التوهين بواسطة الأكسجين، أي يساوي:

$$20595 \times 239 = 4.92 \times 10^{6} \quad \text{times}$$

6-10 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- اذكر أهم مصادر الإشعاعات الطبيعية في البيئة، وما هو معدل الجرعة الفعالة الفردية المتوسطة الناتجة عنها على مستوى العالم؟، وما هي الجرعات الفعالة الجماعية الناتجة عنها؟ (باعتبار أن عدد سكان العالم 6 مليار نسمة).

2- ما هي أهم مصادر الجرعات الإشعاعية الناتجة عن المصادر الصناعية؟، وما هي معدلات الجرعات الفردية والجماعية الناجمة عنها؟

3- ما هي العوامل التي تتحكم في الأخطار الإشعاعية من المصادر الخارجية؟، وكيف يمكن التحكم في قيمة الجرعات الناتجة عن هذه الأخطار، مع ذكر العلاقات الرياضية وشرح معناها؟

4- اشرح معنى معامل جاما النوعي.

5- اشرح كيف يمكن عمل درع لمصدر بيتا، وما هي أهم المواد المفضلة لعمل هذا الدرع؟.

6- كيف يرتبط سمك الدرع المطلوب لجسيمات بيتا من مادة معينة مع مدى هذه الجسيمات في هذه المادة؟.

7- لماذا تحاط مصادر بيتا عادة بدرعين مصنوعين من مواد مختلفة؟ وما هو ترتيب وضع الدرعين بالنسبة للمصدر؟.

8- هل يصلح قانون التوهين الأسي للأشعة السينية وإشعاعات جاما لحساب سمك الدرع في الحالات الواقعية؟، وما هو السبب في إجابتك؟.

9- اشرح مفهوم التراكم، وما هي أسبابه؟، وما هي الظروف التي يمكن عندها إهماله؟.

10- إذا قيل لك أن معامل التراكم لجدار معين عند طاقة معينة وعند نقطة معينة من جهاز للأشعة السينية هو 4، فما هي نسبة دور كل من الأشعة المباشرة والمتشتتة في الجرعة المتولدة عند هذه النقطة.

11- اشرح كيفية عمل درع للوقاية من النيوترونات السريعة. وما هي العوامل التي يجب أن تؤخذ في الحسبان عند عمل مثل هذا الدرع؟.

12- احسب الجرعة الفعالة التي يحصل عليها مسافر بطائرة تطير على ارتفاع 10 كم من سطح البحر لمدة 7 ساعات.

13- احسب الجرعة الفعالة التي حصل عليها طيار يطير على ارتفاع 20 كم لمدة ساعة ونصف.

14- اضطر أحد الفنيين إلى أن يعمل في منطقة يبلغ متوسط الجرعة الفعالة فيها 150 ميكروسيفرت/ساعة، كم ساعة يسمح له بالعمل خلال الأسبوع، بحيث لا تتجاوز الجرعة المتراكمة له في أسبوع 0.4 ميللي سيفرت؟، احسب كم مرة يجب تخفيض متوسط الجرعة بحيث يتمكن من العمل لمدة 30 ساعة أسبوعيا.

15- مصدر سترونشيوم 90 (مصدر بيتا) نشاطه الإشعاعي 3 ميللي كوري، احسب معدل الجرعة الناتجة على مسافة 40 سم من هذا المصدر (أهمل الامتصاص في الهواء).

16- احسب معدل الجرعة المكافئة الناتجة على مسافة 60سم من مصدر فسفور 32 إذا علمت أنه عند تسجيل هذه الجسيمات على بعد 30 سم من المصدر بواسطة عداد غايغر قطر نافذته 2 سم كان معدل العد 3000 جسيم/دقيقة (أهمل الامتصاص في الهواء) .

17- احسب معدل الجرعة الفعالة الناتجة على مسافة 0.5 م من مصدر كوبلت 60 نشاطه الإشعاعي 60 كيوري، ثم احسب المسافة التي يتحقق عندها حد الجرعة للعاملين المهنيين.

18- مصدر سترونشيوم 90 مستخدم في الطب على شكل شريحة رقيقة نشاطه الإشعاعي 1 كوري محاط بدرع من الألومنيوم يكفي بالكاد لامتصاص جسيمات بيتا الصادرة من المصدر، ما هي نسبة طاقة جسيمات بيتا المتحولة لأشعة سينية؟، وما هو عدد فوتونات الأشعة السينية الصادرة عن الدرع، علماً بأن العدد الذري للألومينيوم هو 13.

19- ما هو مدى جسيمات بيتا الصادرة من المصدر المذكور في المسألة السابقة؟، وما هو سمك درع جسيمات بيتا المطلوب؟

20- إذا علمت ان السيزيوم137 يصدر يتفكك إلى الباريوم137 الذي يصدر فوتونات جاما بطاقة 662 ك.إ.ف احسب معامل جاما الموعي للسيزيوم 137.

21- مصدر سيزيوم 137 يبلغ نشاطه الإشعاعي 3000 ميغا بيكريل،

احسب الجرعة الفعالة على مسافة 1م منه، إذا علمت أن السيزيوم يصدر فوتونات جاما بطاقة 662 ك.إ.ف في 85 % فقط من تفككاته، ثم احسب سمك الدرع اللازم حتى تصبح الجرعة الفعالة 25 ميكروسيفرت/ساعة على بعد 50 سم من المصدر.

22- مصدر كوبلت 60 نشاطه الإشعاعي 10 كيلو كيوري، احسب معدل الجرعة الفعالة المتولدة عن هذا المصدر على مسافة 2 م منه. وما هو سمك درع الرصاص اللازم لاحتواء المصدر إذا علمت ان معامل التراكم من هذا الدرع يساوي 6.

23- مولد نيوتروني يصدر نيوترونات سريعة بطاقة 14 م.إ.ف. احسب سمك الدرع المائي اللازم لخفض التدفق النيوتروني بمقدار 40960 مرة.